

新しい現場透水試験法（動燃式 JFT）の開発と測定例

Development of New Aquifer Test Method and its Application to Granite and Sand Stone

やなぎ 柳 さわ 澤 こう 孝 いち 一*
にし 西 がき 垣 まこと 誠** ひら 平 とう 藤 よう 洋 あきら 章*
い ち 一***

1. まえがき

近年、無重量実験施設、燃料地下備蓄、高レベル放射性廃棄物地層処分等、地下深部岩体を対象とした地下空間利用計画が注目されている。こうした地下空間利用における技術的課題の一つとして地下水問題がある。特に高レベル放射性廃棄物地層処分では、深部における難透水性岩盤の透水係数および間隙水圧を精度良く測定することが必要であり、具体的には透水係数が $10^{-5} \sim 10^{-9}$ cm/s またはそれ以下の岩盤が対象とされる。

このような難透水性岩盤の透水係数を精度よく測定するには従来の原位置試験機では適用性に欠ける面があった。そこで筆者らは透水係数が $10^{-5} \sim 10^{-9}$ cm/s の深部難透水性岩盤において、効率よく透水係数および間隙水圧を測定する原位置試験方法(低水圧制御水理試験法(動燃式 JFT)と呼ぶ)を考案、開発した。またこの試験機を用いて、既にいくつかの現場において透水係数の測定を行った。本報告ではこの試験機の概要と測定方法、および測定結果の例について述べる。

2. 試験機の概要と測定原理

2.1 試験機の概要

原位置における透水試験法は図-1のように分類される。精度のみを考えるなら多孔式が良いのだが、岩盤のように透水層と不透水層(遮水層)の区分が明りょうでない場合、その適用が難しく、また深さ方向に連続的に測定することもできない等の欠点がある。そのため、単孔式透水試験法を採用した。定常法と非常法を比較すると、定常法は地下水が定常状態になるまで測定する必要があり、測定効率が悪い。定常に達するまでの所要時間は西垣¹⁾によると次式で求められる。

$$t = 60000 \times (S_s/k) \dots\dots\dots(1)$$

t: 95%定常に達する時間 (s)

S_s : 比貯留係数 (cm⁻¹)

k: 透水係数 (cm/s)

前記したように難透水性岩盤を対象とする場合、条件と

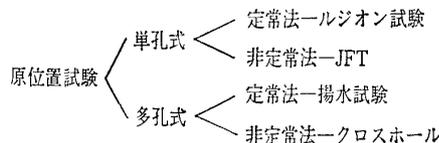


図-1 原位置透水試験法の分類

して $S_s=1 \times 10^{-8}$ cm⁻¹, $k=1 \times 10^{-8}$ cm/s 程度を見込む必要があり、(1)式で定常に達する時間を試算すると約16時間が必要となる。一方、非常法の場合にはこのような制約はなく、比較的短時間で測定を終了させることができる。

以上のことより単孔式非常法、すなわち、一般に JFT または孔内湧水圧試験と呼ばれる試験法を採用することにした。しかし JFT は図-2(A)のようにトリップバルブ、水位測定ロッドおよび水位計の単純な装置から成り、本来はトンネル掘削時の湧水等、透水性の良い岩盤を対象とした試験法である。したがって、大深度の難透水性岩盤を対象とした場合、いくつかの問題点があり、効率の良い測定は期待できない。そこで JFT をベースにして、改良したのが図-2(B)に示す本試験機である。以下に従来の JFT における問題点と、それに対し本試験機で改良した点について述べる。

① 作業効率の向上

従来の JFT はトリップバルブを地上から操作して開閉

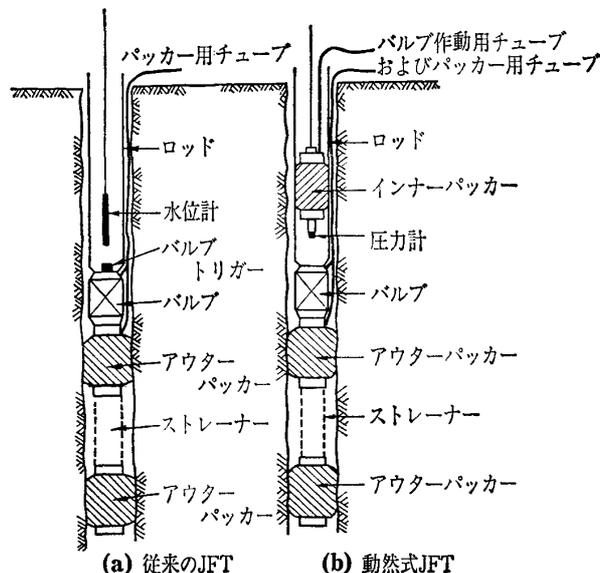


図-2 JFT 装置概念図

*動力炉核燃料開発事業団
**岡山大学助教授 工学部
***大成基礎設計機

することができないので、1回の測定ごとに地上に回収し再セットする必要があり、特に測定深度が深くなると効率が悪くなる。そこで地上操作できる開閉自在のバルブを使用し、1回ごとの昇降作業を不要とするように改良した。

② 水撃効果の防止

従来の JFT は原則的に測定管内を大気圧に開放した状態から測定を開始する。そのため測定深度が深くなると過大な水頭差を発生させ、水撃による岩盤の破壊、目詰まり等が起こる可能性がある。そこで、管内水のある程度残して過大な水頭差を発生させないようにする。

③ 難透水性岩盤における間隙水圧の測定

従来の JFT では難透水性岩盤の間隙水圧を測定管内の水位として測定しており、管内に地下水が流入する必要があるため非常に時間がかかり、透水係数が 10^{-8} cm/s 以下となると実用上測定が困難となる。そこで測定管内にパッカーによる閉鎖空間を作り、その圧力として間隙水圧を測定する手法（以後これをインナーパッカー法と呼ぶ）を採用した。この手法は地下水の移動が少なく、極めて迅速に平衡状態になる。

④ 難透水係数の測定

従来の JFT のように管内水位を測定する手法では、難透水性岩盤の場合水位の回復が遅いため、S/N 比の点から問題がある。そこで上記した間隙水圧測定時の閉鎖空間内に瞬間的に圧力を加え、その圧力低下速度から透水係数を決定する。このような方法はパルス法と呼ばれ、従来岩石の室内透水試験に用いられていた。

従来の JFT とシステム上異なるのは地上操作できる開閉自在バルブと、水圧計、電磁バルブ等を装備したインナーパッカーシステムの2点である。

なお本試験機ではある程度透水性の良い岩盤にも対応できるように、2種類の透水試験が行えるようにした。一つはここに説明したパルス法であり、もう一つは従来の JFT 試験と同様に管内水位を測定する方法（ここでは通常法と呼ぶ）である。この通常法は初期管内水位が間隙水圧より低い場合は回復法、逆に高い場合は注入法とそれぞれ呼ばれる。本試験機は通常法の回復法、注入法がいずれも行える。

2.2 測定原理

本装置の特徴はインナーパッカーの使用により難透水性岩盤の間隙水圧とパルス法による透水係数の測定が可能なことである。間隙水圧の測定に際しては図-3に示すように測定管内でインナーパッカーを拡張すると、測定区間を含んだ閉鎖空間が発生する。この閉鎖された空間内では移動する水量は極めて少ないので、圧力伝播によって短時間に間隙水圧の測定が可能となる。これは埋設型の電気式間隙水圧計と同じ考えであるが、この場合は深度に見合った容量が必要となり、測定深度が深くなると絶対精度が低下してくる。インナーパッカー法では間隙水圧の大部分を管

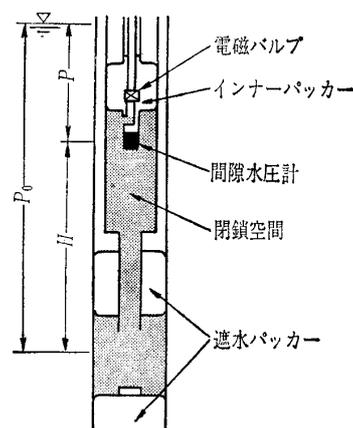


図-3 インナーパッカーと閉鎖空間概念図

内水位で置き換えるので、低圧の圧力計1つで測定することができる。つまり図-3に示すように埋設型の間隙水圧計は P_0 の容量が必要なのに対し、インナーパッカー法は $P=P_0-H$ の容量で足り、絶対精度が向上する。さらに埋設してはならないので水圧計の点検交換がいつでも行え、常に精度を維持できる利点もある。筆者らは 5 kgf/cm^2 の圧力計を使用しているが、実用上十分な精度である。

パルス法については当方法を原位置試験に適用した例は Cooper (クーパー) ら²⁾の文献にみられるが、彼らの報告では水の変形のみを考えている。しかし本試験機のようにラバーパッカーを用いて測定区間を設定する場合、パッカーの弾性を無視することはできない。このため水とパッカーの変形を考慮した算定式を用いることにする。今日最もよく用いられる Hvorslev (ボシュレフ)³⁾の式によって透水係数を算定する場合、パルス法では次の(2)式に書き換えて示される。

$$k = \frac{\theta^2 \ln(L/R)}{2 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \ln(P_1/P_2) \dots\dots\dots(2)$$

k : 透水係数

θ : 仮想半径

L : ストレーナー長

R : ボアホール半径

t_1, t_2 : 圧力測定時間

P_1, P_2 : t_1, t_2 における間隙水圧との圧力差

Hvorslev の式と異なるのは水頭差 h のかわりに圧力差 P を用いることと、ロッド半径 r のかわりに仮想半径 θ を用いる点である。圧力差 P を用いることに関してはあえて説明するまでもないが、仮想半径 θ については以下に若干の説明をする。一般に透水係数を求める場合、ある水頭差（圧力差）を発生させ、その時移動する水量から透水係数を算定する。Hvorslev の非定常式ではロッド内の水位変化量を水量として用いており、そのためロッド半径がパラメーターとして必要になる。パルス法の場合装置の弾性変形量を水量としてとらえるので、この変形量をパラメーターとする仮想半径が形式上必要になる。仮想半径 θ は次式

で示される。

$$\theta^2 = \left(\frac{V_W}{E_W} + \frac{V_P}{E_P} \right) \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta H} \dots\dots\dots(3)$$

V_W : 閉鎖空間内の水の体積

E_W : 水の変形係数

V_P : パッカーの体積

E_P : パッカーの変形係数

$\Delta P, \Delta H$: 単位の圧力および水頭

水に関するファクターは容易に知れるがパッカーに関しては孔径、バックプレッシャー等の要因があり、キャリブレーションによりファクターを決定した。(3)式ではパッカーに関する項は形式上 V_P/E_P としているが、キャリブレーションでは単位圧力当たりの体積変化量 $\Delta Q/\Delta P$ で求められる。柳澤ら⁴⁾によると、 $\phi 100$ mm の孔でダブルパッカーを用いた際の $\Delta Q/\Delta P$ は $1.05 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{g}/\text{cm}^2$ である。 E_W を $2.3 \times 10^7 \text{ g}/\text{cm}^2$ とすると(2), (3)式は実用上次の(4), (5)式に書き換えられる。

$$\theta^2 = \left(\frac{V_W}{2.3 \times 10^7} + 1.05 \times 10^{-4} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \dots\dots\dots(4)$$

$$k = \frac{(V_W/2.3 \times 10^{-7} + 1.05 \times 10^{-4}) \ln(L/R) \ln(P_1/P_2)}{2 \cdot \pi \cdot (t_2 - t_1)} \dots\dots\dots(5)$$

以上がパルス法の測定原理である。

2.3 試験機と測定手順

製作した試験機は $\phi 66$ mm のボーリング孔に挿入できるように最大外径を $\phi 59$ mm としてある。また測定精度の向上、作業効率の向上を計るため遮水パッカーの有効長を従来の2倍近いものとし、ロッドについてもリークを防ぐため継手部分にOリングを装着したものを使用した。インナーパッカーシステムは水圧計、電磁バルブが装着され、

電動巻取りドラムを介して地上と結ばれる。測定手順は本試験機の場合、図-4のように間隙水圧を先に測定する。間隙水圧の測定だけなら、どちらでも良いのだが、透水試験に際しては初期条件として定常安定状態からスタートさせる必要がある、そのために初めに間隙水圧を測定し、安定してから透水試験を行う。

また間隙水圧を先に測定するのは、その安定時間からパルス法と通常法のどちらを採用するかの判断基準としても必要である。つまり安定に長時間を要する場合は透水係数が小さいのでパルス法を採用し、逆に短時間で安定するなら通常法を用いることになる。

透水試験に際しては通常法の場合、インナーパッカーを解除して水圧計を水位計として用いる。パルス法の場合は間隙水圧測定の状態から、そのまま内蔵の電磁バルブを開いて閉鎖空間を昇圧し、その後の圧力回復速度を測定する。パルス試験に必要な圧力は地上から加圧しておき、実際の閉鎖空間における試験圧力は $1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 程度とし、その制御は電磁バルブの開放時間によって行う。

3. 試験機の性能の検討

3.1 試験の概要

製作した試験機の性能を原位置試験により評価した。試験現場は岐阜県東部の低山地帯で、基盤の領家花崗岩を試験対象とした。この領家花崗岩は岩相変化が著しく、割れ目が発達している。測定に用いたボーリング孔は孔径 99 mm (HQWL) で、掘削深度は 1000 m である。

測定深度の決定に際してはパッカーの遮水性に関し特に注意を払った。パッカーの遮水性を原位置で完全にチェックすることは困難であり、孔壁の状態が唯一の判断基準となる。そのためにボアホールテレビ等、各種検層を行い、その結果に基づいて測定位置を選定した。

原位置透水試験の精度に関しては、キャリブレーションが困難なため絶対的な検討手法はないが、ここでは繰返し測定時の再現性、測定手法の違いによる結果の比較、および理論的考察等によって検討を行っている。また、試験時の設定差圧、作業効率についても検討を行った。

3.2 検討結果

1) 繰返し測定時の再現性

繰返し測定については表-1に示すようにA, Bの2とおりの検討を行っている。Aは遮水パッカーを解除しないで連続的に繰返し測定したものであり、1回目は回復法、2回目は注入法となっている。Bは1回目の測定から約半年後に同一深度で測定したものである。

測定結果は良い一致をしており、十分な再現性があるものといえる。

2) パルス法の精度

パルス法と通常法との比較検討試験を、透水係数が $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm}/\text{s}$ の岩盤で実施した。透水係数がこれより小さ

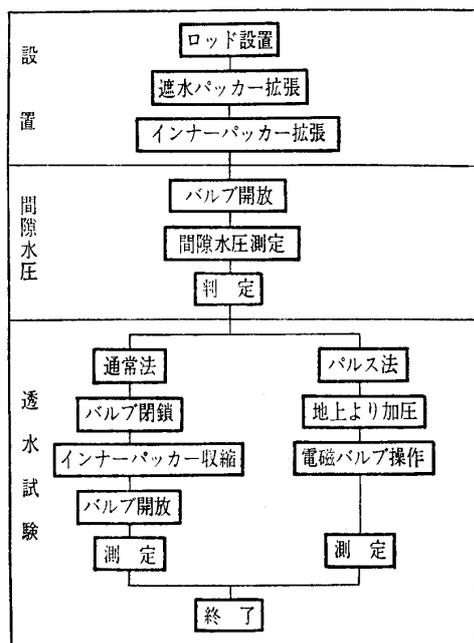


図-4 測定手順フロー

表-1 繰返し再現性の比較

区分	試験法	1回目	2回目	偏差率(%)
A	パルス	8.3×10^{-8}	9.2×10^{-8}	5
	通常法	1.0×10^{-4}	8.9×10^{-5}	6
	通常法	4.7×10^{-4}	4.0×10^{-4}	8
B	通常法	4.6×10^{-4}	4.1×10^{-4}	6
	通常法	3.7×10^{-5}	2.5×10^{-5}	19
	通常法	4.7×10^{-6}	5.8×10^{-6}	10
	パルス	6.8×10^{-8}	3.3×10^{-8}	35

単位: cm/s

$$\text{偏差率} = \frac{1\text{回目} - 2\text{回目}}{1\text{回目} + 2\text{回目}} \times 100\%$$

表-2 パルス法と通常法の比較

例	パルス法	通常法	偏差率
1	5.5×10^{-7}	6.1×10^{-7}	5%
2	1.8×10^{-6}	1.3×10^{-6}	16%

単位: cm/s

$$\text{偏差率} = \frac{1\text{回目} - 2\text{回目}}{1\text{回目} + 2\text{回目}} \times 100\%$$

くなると通常法では測定が困難となり、逆に大きくなるとパルス法では圧力変化速度が早すぎ、測定が難しくなる。比較した例を表-2に示す。いずれも良い一致を示しており、パルス法は通常法と同一の精度を有すると判断できる。

3) 測定の下限値

測定の下限値に関しては理論的には時間さえかければ無限なのだが、現実には測定時間に限りがあるため一定の測定限界が存在する。

パルス法を用いた場合で、Hvorslevの式により測定時間を算出した例を図-5に示す。算出条件として残留水頭差を10cm, 初期水頭差を500cm, その他の条件は原位置試験時と同様とした。また実測例も合わせて図中に示した。図より分かるように測定時間を24時間に設定すれば、

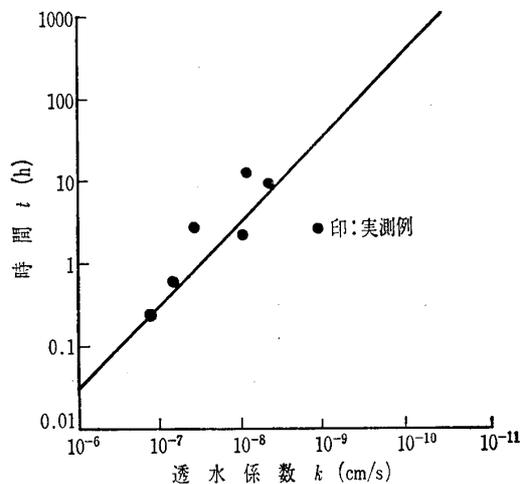


図-5 透水係数と必要な測定時間

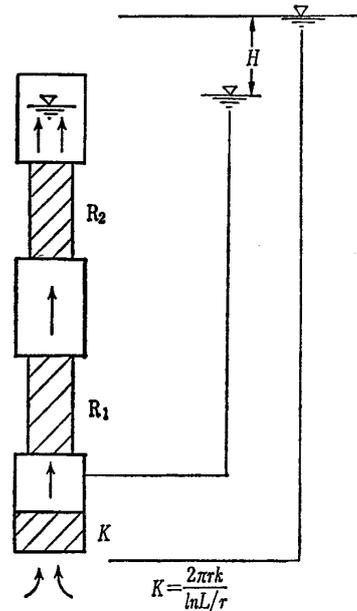


図-6 流路抵抗検討モデル図

透水係数 10^{-9} cm/s オーダーが測定限界である。また実測例では測定時間が予想時間より長い場合がある。これは貯留係数が無視できないほど大きくなったためであり、Hvorslevの式の適用外である。

4) 測定の上限値

本測定機は図-2のようにインナーパッカーとバルブの2箇所で通水断面積が絞られており、通水量が大きい場合、すなわち透水係数が高い場合に測定に支障を起す可能性がある。以下に図-6の検討モデルに従い、流体力学上の問題について検討する。まず管内抵抗について検討する。ここで岩盤の透水係数は次式で得られる。

$$K = \frac{\ln(L/R)\alpha}{2\pi L} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 R_2 - \alpha(R_1 + R_2)} \dots\dots\dots(6)$$

$$\alpha = \frac{\pi r^2}{t_2 - t_1} \ln(H_1/H_2) \dots\dots\dots(7)$$

また抵抗 R_1, R_2 を考慮しない場合は次式となる。

$$K' = \frac{\ln(L/R)\alpha}{2\pi L} \dots\dots\dots(8)$$

したがって誤差率 β は

$$\beta = \frac{K}{K'} = \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 - \alpha(R_1 + R_2)} \dots\dots\dots(9)$$

で示される。またバルブとインナーパッカーの抵抗 $R_1 \cdot R_2$ はナビエ・ストークスの式により $R_1 = 35 \text{ cm}^2/\text{s}$, $R_2 = 1.8 \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。 $L = 260 \text{ cm}$, $R = 5 \text{ cm}$, $r = 1.6 \text{ cm}$ とし α および β を求めると表-3となる。

透水係数が $1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ では24%以上の誤差となり、流路抵抗からの測定限界である。

次に乱流の発生に関して検討する。層流限界レイノルズ数を2000として算定すると、ロッド内の流速(水位変化速度)が3cm/s以上になると乱流が発生し、これを透水

表-3 α, β, k 算定一覧

$k(\text{cm/s})$	$\alpha(\text{cm}^2/\text{s})$	β
1×10^{-0}	1.70	242.6
1×10^{-1}	1.64	25.16
1×10^{-2}	1.21	3.416
1×10^{-3}	0.33	1.242
1×10^{-4}	0.040	1.024

表-4 乱流発生限界

水頭差 (cm)	透水係数 (cm/s)
50	1.2×10^{-3}
100	5.9×10^{-4}
300	1.9×10^{-4}
500	1.2×10^{-4}
1000	5.8×10^{-5}

係数 k と水頭差 H との関係式で示すと(10)式となる。

$$k = \frac{r^2 \cdot \ln(L/R)}{2 \cdot L} \ln(H/H-3) \dots\dots\dots(10)$$

前記のファクターを用いて k と H を試算すると表-4 のようになり、透水係数が大きくなるほど水頭差を小さくしなければならない。標準水頭差を 10 m とすると、透水係数が $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 以下の場合に、層流条件が成立する。測定上はある程度水頭差が必要であるため、透水係数 10^{-4} cm/s オーダーが実用上の測定上限である。

5) 透水試験時の設定差圧

測定に際しては S/N 比の問題から水頭差を大きくしたほうが良いのだが、前述したように岩盤の破壊、目詰まり等の問題があり、水頭差をむやみに大きくすることはできない。図-7 はいずれもパルス圧を順次大きくして、繰返し測定をした例である。これを図-8 のようにパルスの初

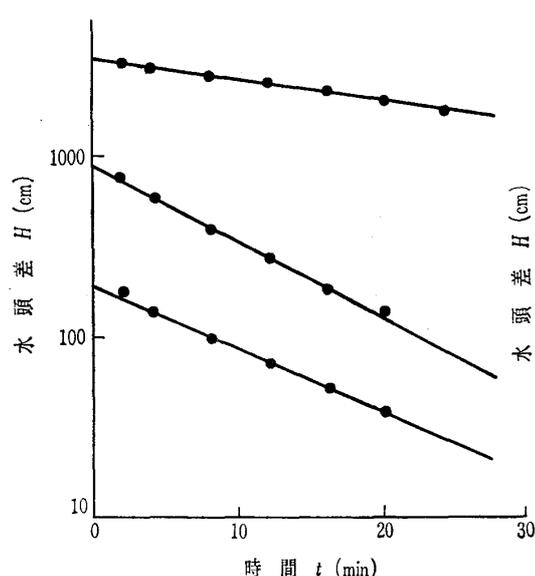


図-7(a) 繰返し測定例 1

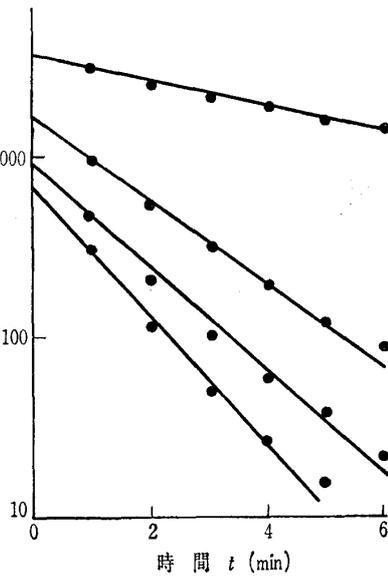


図-7(b) 繰返し測定例 2

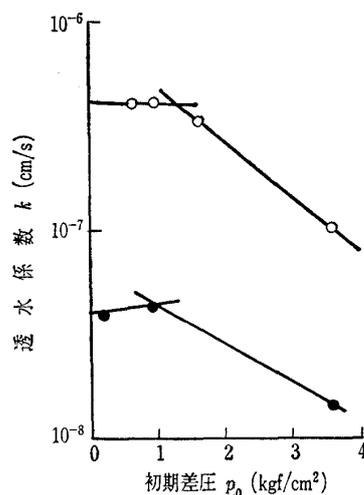


図-8 透水係数と初期差圧の関係

表-5 作業例

CASE	深度 (G.L.-m)	透水係数 (cm/s)	作業項目	備考
1	245	1×10^{-4}	透, 間	前日設置
	249	1×10^{-4}	透, 間	
	304		設置	
2	51	2×10^{-7}	透, 間	前日設置
	59	4×10^{-6}	透, 間	
	79		設置	

透は透水試験, 間は間隙水圧測定

期圧と透水係数で示すと、水頭差が 1 kgf/cm^2 を越えた付近に変曲点があり、水頭差を大きくすると透水係数が低下する傾向が認められる。

この点に関する研究は不十分であり、一つの事例報告としてとどめるが、透水試験の水頭差を 1 kgf/cm^2 程度におさえるべきとする結果を得ることができた。

6) 作業効率

間隙水圧測定の短縮、測定ごとの昇降作業の不要化などにより作業効率は大幅に向上した。表-5 に示すように本試験機では、深度、透水係数にあまり関係なく一定の効率で作業を進めることができる。

ただし、透水係数が 10^{-9} cm/s のオーダーとなると 1 日に 1 点が限度であった。

4. 透水試験に関する 2, 3 の考察

一連の試験と検討を通じて透水試験法に関する 2, 3 の見地が得られたのでここに示す。

4.1 定常法と非定常法との比較

定常法（揚水試験）と非定常法の比較を砂岩層において行った例を示す。使用した測定孔は自噴しており、湧水量を計れば、結果的に揚水試験における平衡状態（定常状態）と同じ条件になる。したがって、ここで非定常試験を行い比較した。解析はいずれも Hvorslev の式を適用させ式上の条件も統一した。測定結果はそれぞれ、

- ・定常法： $k=2.7 \times 10^{-6}$ cm/s
- ・非定常法： $k=4.0 \times 10^{-6}$ cm/s

となった。従来定常法と非定常法は一致しないと言われていたが、今回の測定では良く一致している。

理論的には両者は測定誤差範囲内で一致するべきであり、従来両者の結果が不一致とされてきたのは、試験条件の問題点に起因するものと考えられる。今回の実験では自噴孔のため、放置期間中の完全な洗浄効果が期待でき、条件が良かったので一致したものと考えられる。

4.2 非定常における初期状態の安定

非定常法の場合、初期条件として平衡状態を設定しており、筆者らはこれを満足させるため間隙水圧を先に測定している。しかし一般の非定常水理試験では初期条件に対し比較的ルーズなのが現状である。それらの試験では装置設置後ただちに測定を行う場合が多く、このような初期条件の違いは当然測定結果に誤差を発生させる。理論的には平衡に達する以前の状態を初期条件にすることも可能であろうが、それを定量的に把握すること自体が難しく、解析的に対処するのは事実上不可能と考える。

このような問題を検討するため、強制的に平衡状態を乱

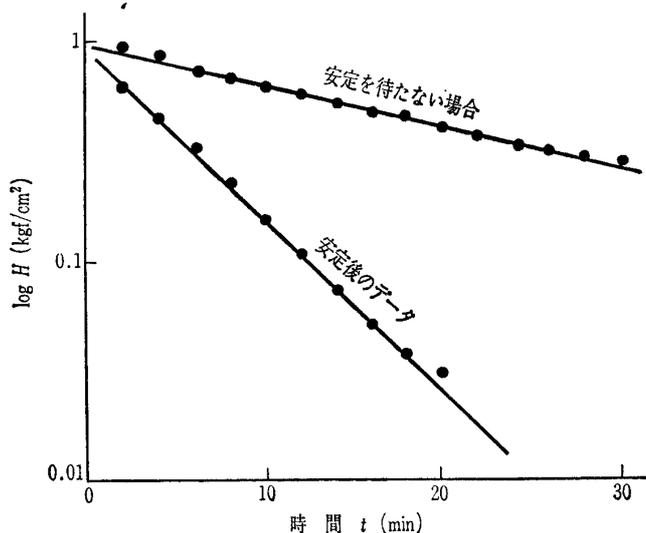


図-9 初期安定の及ぼす影響

して初期条件が測定結果に及ぼす影響を調べた。対象とした岩盤の透水係数は 8.7×10^{-8} cm/s で、これはパルス法によって得られた値である。測定後管内に水を注入して $+1$ kgf/cm² で2時間放置してから、再度パルス法により透水係数を測定した。その結果は 2.5×10^{-8} cm/s となり、約 1/3 の値となった。

注水によって間隙水圧が平衡状態よりも高い状態から測定を行っているため、水頭差は正規の方法に比べ小さくなり、回復速度は遅くなる。したがって、透水係数が小さく測定されるのは当然予想される結果である。この測定結果は図-9に示したが、初期条件の違いはグラフ上に認められない。つまり測定結果からは初期条件の良否は判断できず、本試験機のように事前に間隙水圧を測定しない限り、解析条件を満たした非定常試験を行うことは難しいことが分かる。

5. まとめ

動燃式 JFT は開発後約2年を経ており、試験機として完成した。その性能評価においては以下のことが判明した。

- ① 測定結果の再現性は高く、試験機としての精度は良い。
- ② パルス法は通常法と同様の精度が得られている。
- ③ 難透水係数の測定限界は 10^{-9} cm/s オーダーである。
- ④ 高透水係数の測定限界は 10^{-4} cm/s オーダーである。
- ⑤ 大深度の作業効率は大幅に向上した。
- ⑥ 透水試験時の差圧を大きくすると透水係数の測定値が低下することが判明した。
- ⑦ 定常法と非定常法は理論通りに一致するのを確認した。
- ⑧ 非定常透水試験は平衡状態を初期状態としないと誤差が発生する。

最後に本試験機の製作から現場試験まで、種々の便宜を計っていただいた動力炉・核燃料開発事業団の関係者各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 西垣 誠：単孔式透水試験法の問題点の検討，地下水と井戸とポンプ，第28巻，第9号，pp.1~10，1986。
- 2) Hilton H. Cooper Jr., John D. Bredehoeft and Istavros S. Papadopoulos: Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water, Water Resources Research, Vol.13, No. 1, pp. 263~269.
- 3) Hvorslev M. J.: Time lag and Soil permeability in ground water observation, US army Corps of Eng., Vicksburg Miss., 1951.
- 4) 柳澤孝一・西垣 誠・平田洋一：動燃式低水圧制御水理試験機（動燃式 JFT）の原理と適用例，地下水学会誌，第30巻，第3号，pp. 127~137，1988。

(原稿受理 1989.4.17)